

***А. Ю. Чурюмов*, А. В. Поздняков, М. Г. Хомутов, А. Г. Войтенко,
А. А. Черешнева***

Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, г. Москва
**churyumov@misis.ru*

Научный руководитель – канд. техн. наук *А. Н. Солонин*

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ СТАЛИ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ БОРА

Нержавеющая сталь с высоким содержанием бора является основным материалом для использования в стеллажах уплотненного хранения отработанного ядерного топлива. С использованием комплекса *Gleeble 3800* исследовано термомеханическое поведение нержавеющей стали с 2,05 и 3,15 мас. % бора в интервале температур 800 – 1150 °С. С помощью экспериментальных данных построены модели связи напряжения течения с параметрами горячей деформации на основе уравнения Аррениуса и искусственной нейронной сети (ИНС).

Ключевые слова: сталь с высоким содержанием бора, горячая деформации, моделирование, искусственные нейронные сети.

***A. Y. Churyumov, A. V. Pozdnyakov, M. G. Homutov, A. G. Vojtenko,
A. A. Cheresheva***

MODELLING OF THE FLOW STRESS OF THE STEEL WITH HIGH BORON CONTENT

Stainless steels with high boron content are the important materials for use to storage of the spent nuclear fuel. Hot compression tests of stainless steel with 2.05 and 3.15 wt. % of boron were performed in the temperature range of 800 – 1150 °C by using a *Gleeble 3800* thermomechanical simulator. Based on the experimental true strain-true stress data, the modified Arrhenius-type constitutive model and artificial neural network model (ANN) were established for the stainless steels with high boron content.

Keywords: high boron steel, hot deformation, constitutive model, artificial neural networks.

Нержавеющие стали с высоким содержанием бора (более 1 мас. %) являются основными материалами для производства шестигранных труб для стеллажей уплотненного хранения отработанного ядерного топлива (рис. 1) благодаря высокой нейтронпоглощающей способности бора, а

также относительно высокой коррозионной стойкости легированного хромом феррита. Переход атомных электростанций на более обогащенное топливо требует увеличения поглощающей способности материалов. В связи с этим нержавеющие стали с более высокой концентрацией бора необходимы, чтобы гарантировать безопасность и эффективность хранения отработанного ядерного топлива.

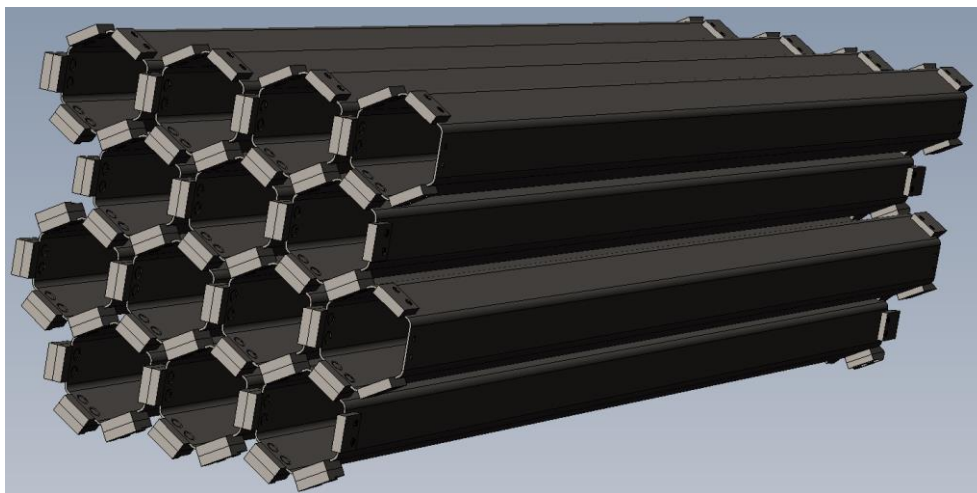


Рис. 1. Элемент стеллажа уплотненного хранения топлива.

Для сокращения потерь при горячей пластической деформации необходимо построить модели связи напряжения течения с параметрами обработки. В последнее время такие модели были построены для прогнозирования напряжения течения широкого круга сталей [1 – 3], в том числе и с применением искусственных нейронных сетей [4 – 5].

Целью данной работы является исследование поведения нержавеющих сталей с высоким содержанием бора в процессе горячей пластической деформации и сравнительный анализ двух типов моделей: на основе уравнения Аррениуса и на основе искусственной нейронной сети.

Слитки сталей с высоким содержанием бора были получены путем плавления в вакуумной индукционной печи из исходных компонентов технической чистоты. Концентрация хрома в сталях составляла около 15%. Концентрации Ti и B были выбраны таким образом, чтобы их соотношение составляло $Ti/B \approx 2$. Номинальный химический состав сталей представлен в табл. 1. Слитки подвергали отжигу в течение 8 ч при температуре 1100 °С, а затем деформировали на степень 60 % при температуре 1050 °С для получения однородной структуры.

Таблица 1

Химический состав сталей (основа Fe)									
Сталь	Cr	Ti	B	Si	Mn	C	Al	S	N
B2	14,8	4,07	2,05	0,52	0,43	0,025	0,30	0,005	0,004
B3	14,9	6,36	3,15	0,67	0,67	0,022	0,39	0,003	0,005

Испытания на одноосное сжатие были проведены с использованием комплекса *Gleeble 3800*. Цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 15 мм нагревали со скоростью 5 °C/с до температуры 1150 °C, отжигали в течение 10 мин, а затем охлаждали до температуры деформации (800, 850, 900, 950, 1000, 1050 и 1150 °C) со скоростью 5 °C/с. После этого деформировали на степень истинной деформации 1,0 при постоянной скорости деформации 0,5, 2,5 или 10 с⁻¹ для стали В2 и 0,5, 2,5 или 15 с⁻¹ для стали В3. Истинные кривые напряжение–деформация были пересчитаны с учетом трения и адиабатического нагрева в процессе деформации.

Микроструктурные исследования проводили с использованием СЭМ *Tescan-VEGA3 LMH*. Фазовые превращения были исследованы методом дифференциального термического анализа (ДТА) при скорости нагрева и охлаждения 0,333 K/с.

Согласно СЭМ (рис. 2) исходная микроструктура стали состоит из двух типов боридов: TiB₂ (темные частицы) и (Fe,Cr)₂B (серые частицы), распределенных в ферритной матрице

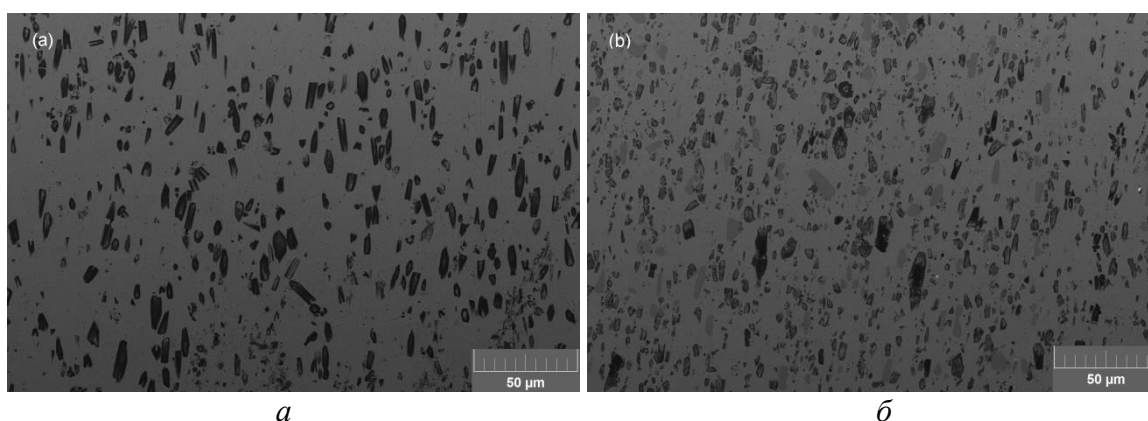


Рис. 2. Исходная структура стали В2 (а) и В3 (б)

ДТА был проведен для определения температурного диапазона деформации. Как можно видеть из рис. 3, температура солидуса для стали В2 составляет 1220 °C, а для стали В3 – 1227 °C. За максимальное значение температуры горячей деформации приняли 1150 °C, чтобы не допустить появления жидкой фазы в структуре из-за адиабатического разогрева образца в процессе деформации при высоких скоростях деформации.

Кривые напряжения течения–деформация представлены на рис. 4. Напряжение возрастает с уменьшением температуры и повышением скорости деформации. Можно видеть, что все кривые текучести демонстрируют упрочнение на начальном этапе деформации и разупрочнение после пикового напряжения. Такое поведение напряжения течения является характерной чертой, указывающей, что в процессе горячей деформации проходит динамическая рекристаллизация.

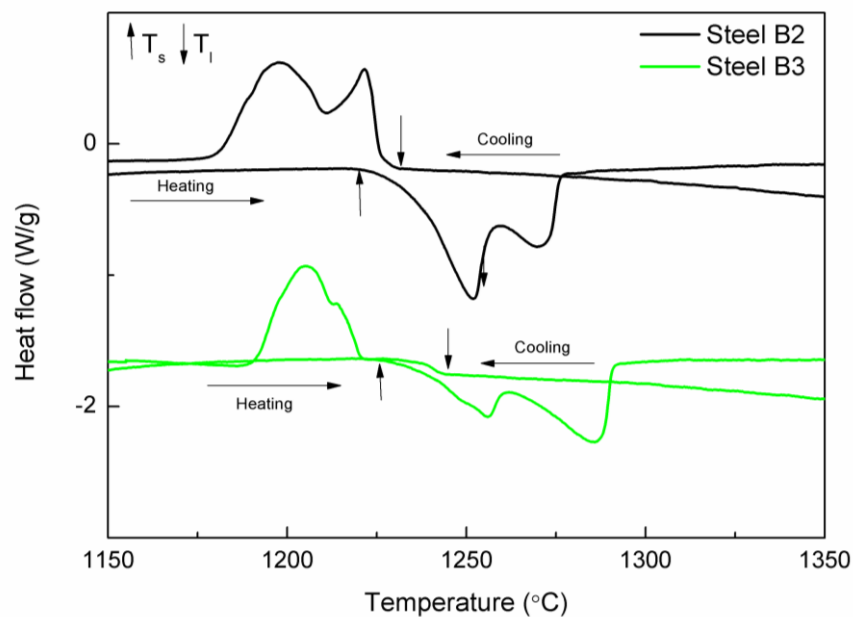


Рис. 3. Кривые ДТА для исследуемых сталей

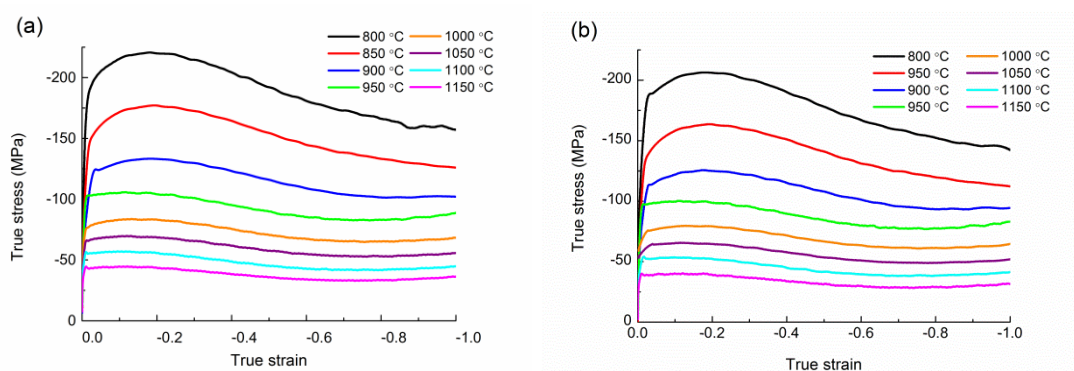


Рис. 4. Напряжение течения при разных температурах для стали В2 (а) и В3 (b) деформированных со скоростью 0,5 с – 1

Уравнения связи напряжения течения с параметрами обработки обычно принимают вид:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

$$Z = A_1 \sigma^{n_1} \quad (\alpha\sigma < 0,8) \quad (2)$$

$$Z = A_2 \exp(\beta\sigma) \quad (\alpha\sigma > 1,2) \quad (3)$$

$$Z = A_3 [\sinh(\alpha\sigma)]^{n_2} \quad (\text{для всех } \sigma) \quad (4)$$

$$\alpha \approx \frac{\beta}{n_1} \quad (5)$$

где $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, с⁻¹, T – температура деформации, К, Q – энергия активации, Дж/моль, A₁, A₂, A₃, n₁, n₂, β и α – константы материала, определяемые по экспериментальным данным. Их значения в

данной работе также связаны со следующими эмпирическими уравнениями:

$$\ln(A_3) = 38.7 + 8.3\varepsilon + 10.0\varepsilon^2 - 23.4\varepsilon^3 + 8.7\varepsilon^4 - 5.6B \quad (R^2 = 0,92) \quad (6)$$

$$\alpha = 0.008 - 0.004\varepsilon + 0.021\varepsilon^2 - 0.023\varepsilon^3 + 0.008\varepsilon^4 - 0.000054B \quad (R^2 = 0,96) \quad (7)$$

$$Q_3 = -397.0 - 115.4\varepsilon - 2.5\varepsilon^2 + 146.8\varepsilon^3 - 64.9\varepsilon^4 + 58B \quad (R^2 = 0,93) \quad (8)$$

$$n_2 = 6.0 - 1.65\varepsilon + 6.94\varepsilon^2 - 9.1\varepsilon^3 + 4.17\varepsilon^4 - 0.82B \quad (R^2 = 0,92) \quad (9)$$

где ε – степень деформации, B – концентрация бора (вес. %).

Многослойный персептрон был использован для построения модели на основе ИНС. Степень, температура, скорость деформации и концентрации бора были выбраны в качестве входных параметров, а напряжение течения – в качестве выходного. Для обучения ИНС были использованы 360 наборов данных, для проверки ее точности – 120.

Как видно из рис. 5, модель на основе ИНС имеет меньшую ошибку расчета (2,7 %), чем модель по уравнению Аррениуса (6,1 %).

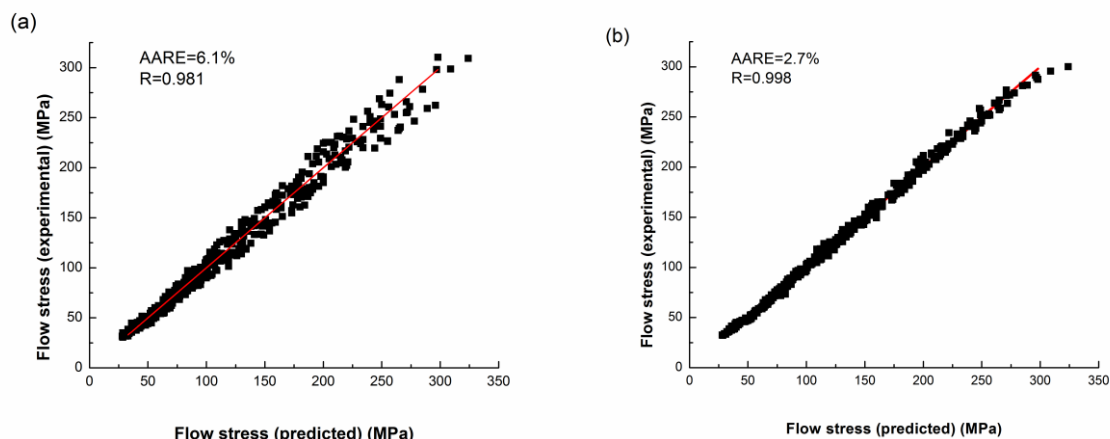


Рис. 5. Сравнение между расчетными и экспериментальными значениями напряжения для модели Аррениуса (а) и ИНС (б)

Построены модели связи напряжения течения с параметрами обработки давлением для стали с повышенным содержанием бора двух. Показано, что модель, основанная на искусственной нейронной сети, показывает более высокую точность расчета напряжения течения по сравнению с моделью, основанной на уравнении Аррениуса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Constitutive modeling for flow behavior of GCr15 steel under hot compression experiments Yin F.[et. al.] // Materials and Design. 2013. V. 43. P. 393–401.

2. Hot deformation behaviour and fracture of 10CrMoWNb ferritic–martensitic steel Churyumov A. Yu. [et. al.] // *Materials and Design*. 2015. V. 74. P. 44–54.
3. Hot deformation behavior of a Nb-containing 316LN stainless steel W. Zhang [et. al.] // *Materials and Design*. 2011. V. 32. P. 4173–4179.
4. Development of constitutive relationship model of Ti600 alloy using artificial neural network Y. Su. [et. al.] // *Computational Materials Science*. 2010. V. 48. P. 686–691.
5. Guo Z., Malinov S., Sha W. Modelling beta transus temperature of titanium alloys using artificial neural network // *Materials Science and Engineering A*. 2005. V. 32. P. 1–12.